



## 타이어 고무 애쉬 치환에 따른 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 내구성능 성능 평가

권성준<sup>1)\*</sup> · 윤용식<sup>1)</sup> · 박상민<sup>2)</sup> · 김혁중<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한남대학교 건설시스템 공학과 <sup>2)</sup>SMI(주) <sup>3)</sup>금호석유화학

### Evaluation of Durability Performance of Fly Ash Blended Concrete due to Fly Ash Replacement with Tire Derived Fuel Ash

Seung-Jun Kwon,<sup>1)\*</sup> Yong-Sik Yoon,<sup>1)</sup> Sang-Min Park,<sup>2)</sup> and Hyeok-Jung Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>SMI(Ltd.), Research Dept., Suncheon 57991, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Kumho Petrochemica R&BD Center, Daejeon 35820, Rep. of Korea

**ABSTRACT** In the paper, durability performance in FA (Fly Ash) blended concrete is evaluated considering replacement of FA with TDFA (Tire Derived Fuel Ash) from 3.0% to 12%. TDFA is a byproduct from combustion process in thermal power plant, where chopped rubber is mixed for boiling efficiency. This is the 1st study on application of TDFA to concrete as mineral admixture. For the work, concrete samples containing 0.5 of w/b (water to binder) ratio and 20% replacement ratio of FA are prepared. With replacing FA with TDFA to 12%, durability performance is evaluated regarding compressive strength, carbonation, chloride diffusion, and porosity. The results of compressive strength, carbonation, and porosity tests show reasonable improvement in durability performance to 12% replacement of TDFA. In particular, clear decreasing diffusion coefficient is observed with increasing TDFA replacement due to its packing effect. Concrete containing TDFA can be effective for durability improvement when workability is satisfied in mixing stage.

**Keywords :** TDFA, durability, fly ash, concrete, carbonation, chloride diffusion, porosity

### 1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 내구적인 건설재료지만 염해와 탄산화와 같은 내구성 문제가 지속적으로 보고되고 있다. 콘크리트는 강재와 다르게 다공성을 가지고 있는 건설재료이며, 공극을 통한 염화물 이온과 이산화탄소는 내부의 철근부식을 야기한다. 이러한 열화 과정은 균열의 진전, 피복 콘크리트의 탈락을 야기하고 최종적으로 구조물의 안전성에 심각한 영향을 미치게 된다.<sup>1,2)</sup> 콘크리트 표면을 유기계 또는 무기계로 코팅할 경우 외부 열화원자의 효과적인 차단이 가능하지만, 박리현상(peeling-off)이 문제되며 이로 인해 장기적인 내구성 확보가 어려운 실정이다.<sup>3,4)</sup> 또한 내구성을 위해서 피복두께를 증가시킬 경우 균열폭의 증가, 시공성, 시멘트계 재료의 과다 사용이 문제될 수 있다.

콘크리트의 단점을 보완하고 내구성능 향상효과를 기대하기 위해 여러 혼화재료들이 개발되어 왔으며, 지금도 활발한 연구가 진행 중이다. 그 중 플라이 애쉬(FA: Fly Ash), 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 실리카 폼(SF: Silica Fume) 등이 혼화제로 널리 사용되고 있다. 이러한 건설재료 혼화제는 산업부산물로서 최근 들어 문제되고 있는 CO<sub>2</sub>저감<sup>5,6)</sup>에 효과적일 뿐 아니라 작업성 개선, 내구성 확보 등 공학적인 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

그 중 FA를 사용한 콘크리트는 장기강도의 증가,<sup>7,8)</sup> 장기 염해저항성 증가,<sup>9)</sup> 건조수축의 감소<sup>10)</sup> 등의 장점이 있다. FA는 화력발전소 부산물로서 석탄(Coal)을 연소시키고 난 뒤 발생하는데, 같이 생성되는 바텀애쉬(Bottom Ash)나 매립회(Pond Ash)보다 효과적인 포졸란계 건설재료이다.

GGBFS는 철강제품제조과정에서 발생하는 미립분을 포집하는 것으로 잠재수경성을 가지고 있으므로 추가적인 수화물의 생성을 통한 공극구조 개선을 야기한다. GGBFS를 혼입한 콘크리트는 장기강도의 개선효과와 내황산성의 증가 등의 공학적인 장점이 있으며,<sup>11-13)</sup> 장기개령에서는 OPC

\*Corresponding author E-mail : jjuni98@hannam.ac.kr

Received March 14, 2016, Revised August 1, 2016,

Accepted October 13, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

콘크리트에 비해 염해저항성이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup> 이러한 수화물 생성은 밀실한 콘크리트를 만들 뿐 아니라, 염화물의 흡착에도 매우 효과적이다.

앞서 언급한 혼화제들 이외에 최근 들어 RHA (Rice Husk Ash) 등도 개발되어 사용되고 있다. RHA를 혼입한 콘크리트는 초기재령에서도 내구성에 대한 저항성을 가지고 있으며, 포졸란 반응 외에도 높은 분말도에 따른 공극 충전 효과가 큰 것으로 알려져 있다.<sup>15)</sup>

열병합 발전소에서는 효과적인 에너지 공급을 위해 유연탄, 폐목재(WCF: Wood Chip Fuel) 등과 함께 30~50 mm의 페타이어를 같이 소각시킨다. 페타이어는 최저 발열량이 약 8,000 kcal/kg으로서 유연탄(약 6,200 kcal/kg)보다 높은 열효율을 나타낸다. 소각 후 발생하는 부산물은 타이어 고무 애쉬(TDFA: Tire Derived Fuel Ash)라고 하는데, 외국에서도 매우 제한적으로 연구가 수행되었다. 기존의 해외 연구에서는 TDFA는 5200 cm<sup>2</sup>/g이상의 비교적 높은 분말도를 가지고 강도개선 및 염해저항성에 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 높은 분말도로 인해 공기량의 확보가 어렵고 Zinc의 영향으로 지연효과가 발생하였다.<sup>16)</sup>

본 연구는 국내에서 생산된 TDFA를 이용한 콘크리트의 내구성 평가에 대한 연구이다. 이를 위해 OPC (Ordinary

Portland Cement) 80%와 FA를 20% 혼입한 배합에 대하여 FA를 중량 대비 최대 12%까지 TDFA로 치환하면서 시편을 제조하였다. 경화된 콘크리트를 대상으로 염해저항성, 탄산화 저항성, 공극구조 등을 분석하였으며 변화하는 내구특성을 고찰하였다. Fig. 1에서는 국내 열 병합발전소에서 생성되는 TDFA의 사진과 발생공정을 나타내고 있다.

## 2. 내구성 평가를 위한 실험 계획

### 2.1 실험의 개요

TDFA를 혼입한 콘크리트의 내구적 특성을 분석하기 위해 재령 28일 및 91일 시편을 대상으로 촉진염해시험, 촉진탄산화 시험, MIP를 통한 공극구조 평가 등이 수행되었다. 압축강도 역시 재령 28일 및 91일 재령을 대상으로 수행되었다. Table 1에서는 본 연구에서 수행된 시험항목을 나타낸다.

### 2.2 실험배합

본 연구는 설계 강도를 24 MPa로 하였고 1종 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)와 KS L 5405 규격을 따르는 2종 FA를 사용하여 배합을 실시하였다. FA의 TDFA치환에 따른 콘크리트의 거동을 알아보기 위해 물-결합재비를 0.5로 고정하였으며, 공기량 4.0%을 목표로 하였다. FA를 시멘트 중량의 20%만큼 치환한 기본 배합에서 TDFA를 결합재 중량대비 3%씩 증가시키면서 최대 12%까지 치환하였다. 공기연행제는 결합재 0.7% 중량을 사용하였으며, 고성능 유동화제(SP: Super-Plasticizer)는 0.6%를 사용하였다. 현재의 TDFA의 적용은 OPC와 직접적으로 치환하기에는 많은 문제가 있으므로 FA 치환을 목표로 하였다. Table 2에서는 본 연구를 위한 배합표를 나타내었다. Table 2에서 TxFAy는 TDFA x% 및 FA y%를 중량비로 나타낸 것이다.

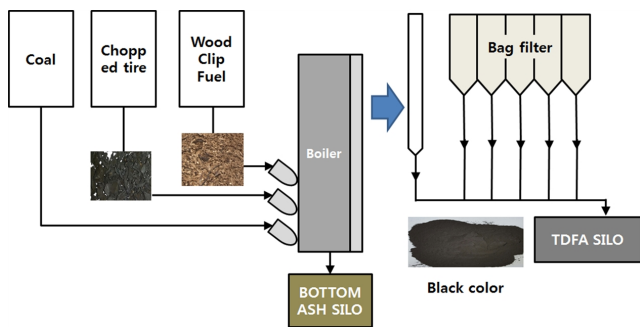


Fig. 1 Photos of TDFA and Derived process

Table 1 Tests for FA concrete with TDFA

List	Test items	Standards	Age
Mechanical Performance	Compressive strength	KS F 2405	28 and 91 days
	Pore structure analysis	MIP-Mercury Intrusion Porosimetry	91 days
Durability Performance	Accelerated diffusion test	Tang's method <sup>17)</sup>	28 and 91 days
	Accelerated carbonation test	KS F 2584	28 and 91 days

Table 2 Mixture proportions for the work

Case	W/B	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	TDFA (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	Chemical ad. (% of binder wt.)
Control	0.5	175	280	70	0	865	882	AE: 0.7%
T3FA17				59.5	10.5	864	881	
T6FA14				49.0	21.0	864	880	
T9FA11				38.5	31.5	863	879	AE: 0.7% SP: 0.6%
T12FA8				28.0	42.0	847	863	

### 2.3 사용재료

Table 3에서는 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성을, Table 4에서는 사용재료의 화학적 조성을 나타내었다. Table 4에서 TDFA의 SiO<sub>2</sub>는 FA의 50%수준이고 이는 일반적인 GGBFS와 비슷한 수준이다. CaO는 수산화칼슘을 직접 생성하는 화합물인데, TDFA의 CaO가 OPC에 비해서는 50%수준이지만 FA보다 월등한 양을 함유하고 있다. 기존의 연구에서는 TDFA를 잔골재 치환에 사용하였는데 5,000 cm<sup>2</sup>/g이상의 고분말을 가지고 있으므로 충전작용(Packing Effect)를 통하여 강도 및 공극구조 개선에 효과적이라고 보고되었다.<sup>16)</sup>

Table 4에서 알 수 있듯이 TDFA는 변동성이 비교적 큰 재료인데 이는 추후 품질관리를 통하여 건설재료로서의 변동성을 낮출 필요가 있다. 또한 높은 황이온 함유량을 가지고 있으므로 이에 대량 사용시 에트린자이트 생성을 통한 체적변형을 가질 수 있으므로 다량 치환은 제한적일 것으로 사료된다. TDFA 샘플의 채취는 K사의 여수 열병합발전소에서 채취한 것이며 총 5회에 대한 평균값 및 변동계수값을 수록하였다.

## 3. 실험결과 및 평가

### 3.1 TDFA를 혼입한 콘크리트의 기초물성

#### 3.1.1 슬럼프 및 공기량

TDFA 혼입율이 증가할수록 작업성은 급격한 저하를 보였는데 이는 TDFA의 분말도가 시멘트보다 크고 비중이 낮기 때문이다. 이는 비중이 낮은 미분말을 사용할 경우 발생하는 초기재령 콘크리트의 문제점으로 보고되고 있다.<sup>18)</sup> 또한 공기량의 감소는 분말도가 높은 시멘트를 사용하거나, 높은 외기온도에서 배합을 할 경우, 그리고 잔골재율이 높

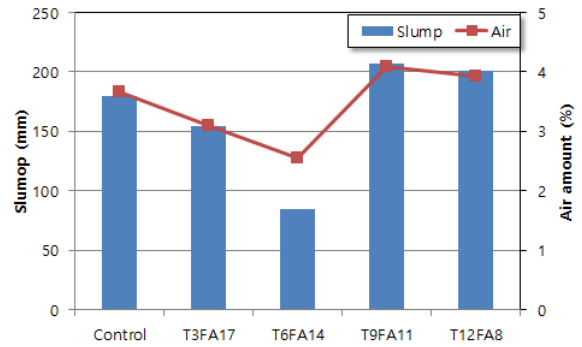


Fig. 2 Slump and air content in concrete with TDFA

은 경우 빈번하게 발생한다. 본 실험은 여름에 높은 외기온도에서 배합을 하였으며, 5,200 cm<sup>2</sup>/g 이상의 TDFA이 사용된 점, 그리고 49.0% 이상의 높은 잔골재율이 혼입된 콘크리트를 제조하여 공기량의 감소가 발생한 것으로 판단된다.

초기 배합에서 TDFA 혼입율 6%이상의 배합에서는 AE제의 혼입량을 늘리고 추가적인 SP제를 혼입해 Workability를 개선하여 배합을 실시하였다. 본 배합의 목표슬럼프와 공기량은 각각 180 mm와 4±1.0%로 설정하였으며, Fig. 2에서는 슬럼프 및 공기량의 변화를 나타내고 있다.

#### 3.1.2 압축강도 평가

압축강도평가는 재령 28일 및 91일에 KS F 2405<sup>19)</sup>에 따라 수행하였고, Table 5 및 Fig. 3에 압축강도 평가 결과 값을 나타내었다. 시험 결과에 따르면 재령과 TDFA 혼입율이 증가함에 따라 강도가 약간 증가하는 경향이 나타났다. T3FA17의 경우, TDFA 미립분 효과가 매우 낮았으며 강도 저하가 발생하였다. Control 배합과 비교시 최대 12%를 혼입한 경우 2~7%의 강도증가를 나타내었다. Fig. 4에서는 TDFA 치환률의 증가에 따른 강도 변화율을 나타내고 있다.

28일 재령과 91일 재령에 대하여 TDFA의 치환률 사이에 강도 차이는 크게 발생하지 않았다. 91일 재령의 TDFA의

Table 3 Physical properties of fine and coarse aggregate

Item	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	2.60	1.00	2.70
Coarse aggregate	25	2.62	0.78	6.78

Table 4 Chemical compositions for OPC, FA, GGBFS and TDFA

Types	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	
OPC	21.96	5.27	63.41	1.96	3,214	
FA	55.66	27.76	2.70	0.49	3,621	
TDFA	average	28.2	8.23	28.9	8.23	5,200
	C.O.V	0.22	0.20	0.21	0.26	0.12

Table 5 Results of average compressive strength

Age (day)	Average compressive strength (MPa)				
	Control	T3FA17	T6FA14	T9FA11	T12FA8
28	26.3	27.5	28.4	26.5	26.9
91	31.7	28.7	33.2	33.1	34.1

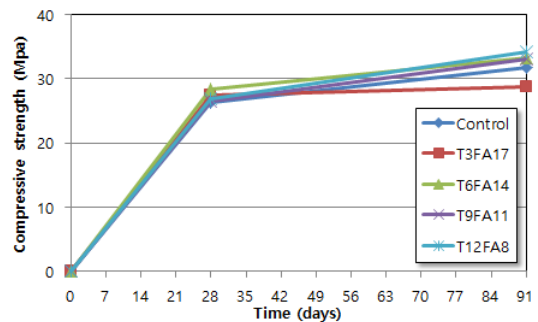


Fig. 3 Compressive strength with varying TDFA replacement

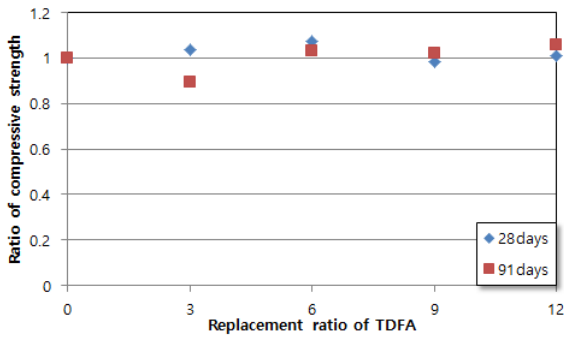


Fig. 4 Ratio of compressive strength with TDFA replacement ratio

3%의 치환률에서 국부적으로 강도저하가 발생하였으나 시편의 제조과정에서 다짐이 부족한 것으로 예상된다. 이를 제외하면 28일 재령의 경우 4.5~7.9%의 강도 증가를, 91일 재령에서는 4.4~7.5%의 증가를 나타내었다. TDFA 치환률에 따라 강도 증가경향은 뚜렷하지 않았으나, 12%의 치환까지는 동등이상의 강도를 나타낸다고 할 수 있다. TDFA의 Packing Effect이외에 가지고 있는 CaO 성분이 시멘트의 수화과와 같이 진행되어 조적이 치밀해지는 것으로 예상된다.

### 3.2 TDFA를 혼입한 콘크리트의 내구특성

#### 3.2.1 공극구조 분석 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 공극구조 특성을 평가하기 위해 재령 91일 시편에 대하여 MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) 시험을 수행하였다. 시편을 파쇄한 뒤, 아세톤에 침지시켜 수화반응을 정지시킨 후 시험을 진행하였다. Control의 경우 17.76%의 공극률을 나타내었으나, TDFA가 6% 이상 혼입된 경우에 모두 Control 보다 낮은 공극률을 나타내었다. 이는 분말도가 높은 TDFA의 Packing 효과에 기인하며,<sup>16)</sup> 추가적인 FA의 포졸란 반응에 의한 공극률 감소보다 Packing 효과가 동등이상으로 크다고 할 수 있다. 또한 FA 보다 큰 CaO 함유량으로 인한 수화반응이 추가적으로 발생했을 것으로 추측된다. TDFA 혼입을 통해 4.0~4.5%정도의 공극률 감소를 나타내었다. TDFA를 사용하지 않은 경우 17.76%의 공극률을 나타내었는데, 6% 이상 치환한 경우 16.96~16.78%의 공극률의 보이고 있었다.

Table 6에서는 공극률 시험조건을 나타내고 있으며, Fig. 5에서는 TDFA를 혼입한 콘크리트의 공극분포를, Fig. 6에서

Table 6 Conditions for MIP

Equipment	Evacuation pressure	Evacuation time	Mercury filling pressure
Auto Pore [V 9500 V 1.08]	50	5 minutes	0.51 psi

- Hg. contact angle: 130 degree
- Hg. surface tension 458 dyne/cm
- Hg. density: 16.5512 g/ml

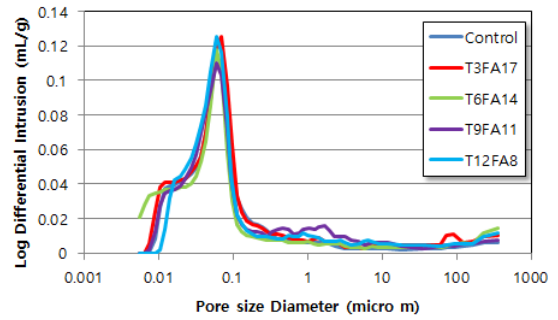
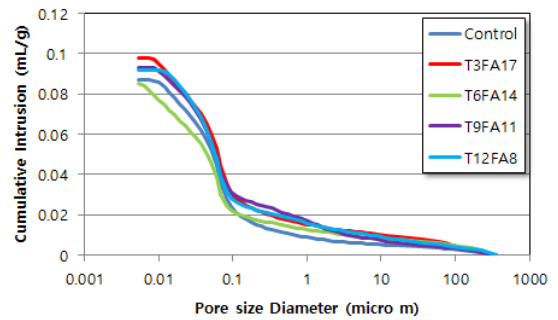


Fig. 5 Pore size distribution of TDFA concrete



(a) Cumulative pore size distribution



(b) Porosity with TDFA replacement

Fig. 6 Cumulative pore and porosity with TDFA replacement

는 누적공극률 분포와 TDFA의 치환률에 따른 공극률 감소를 나타내고 있다.

#### 3.2.2 탄산화 시험

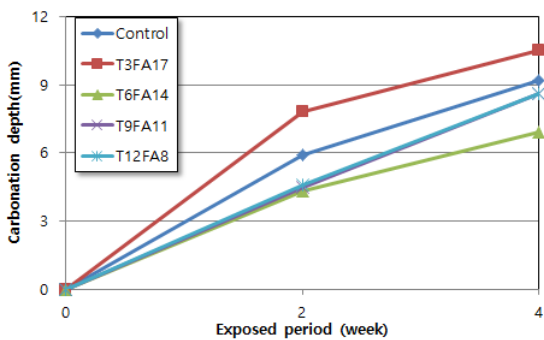
TDFA의 치환률을 증가시키면서 탄산화 특성을 평가하기 위해 KS F 2584에 따라 탄산화 촉진 시험을 수행하였다.<sup>20)</sup> 재령 28일 및 91일 시편을 대상으로 상대습도 60%, 온도 20°C, 이산화탄소 5%의 조건하에서 실험을 수행하였으며, 실험 기간은 2주, 4주로 하여 각 결과 값을 비교하였다. Fig. 7에서는 재령별 탄산화 깊이를 나타내었으며, Fig. 8에서는 탄산화 속도계수를 비교하였다. 탄산화 깊이는 시간의 제곱근에 비례한다고 가정하여 탄산화 속도를 도출하는데, 이론적, 실험적으로 유효하게 사용되고 있다.<sup>21,22)</sup>

탄산화 속도계수의 비교에서 TDFA를 치환한 배합이 FA를 20% 치환한 배합보다 명확하게 탄산화 저항성이 커진 것을 알 수 있다. 전반적으로 28일 재령의 결과보다 91일의 재

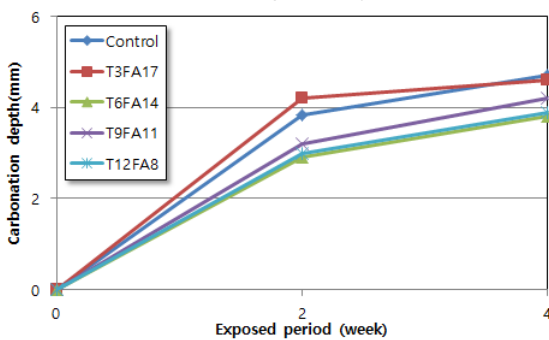
령에서 탄산화 깊이는 거의 48~58%수준으로 감소하였는데, 이는 FA의 포졸란 반응에 의한 구체의 밀실화에 기인한다.<sup>23)</sup> 흥미로운 사실은 FA가 TDFA로 치환되어 갈수록 포졸란 반응은 감소하겠지만, TDFA의 Packing effect 및 수화반

응의 진전으로 이산화탄소 확산성이 감소하여 탄산화 저항성이 증가하는 것을 볼 수 있다. 3%치환의 경우는 큰 효과가 없었으나, 6%이상 치환할 경우 FA 20%치환 배합보다 28일 및 91일 재령 시 탄산화 저항성이 모두 증가하였다.

Fig. 9에서는 치환률에 따른 탄산화 저항성을 비율로 나타내었다. 장기재령에서 TDFA의 치환률에 따른 탄산화 저항성이 뚜렷해짐을 알 수 있다.



(a) curing 28 days



(b) curing 91 days

Fig. 7 Carbonation depth with time

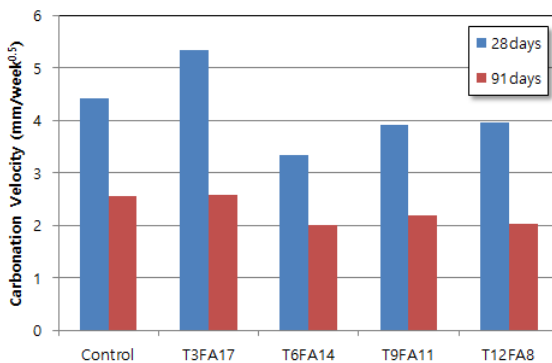


Fig. 8 Comparison with carbonation velocity

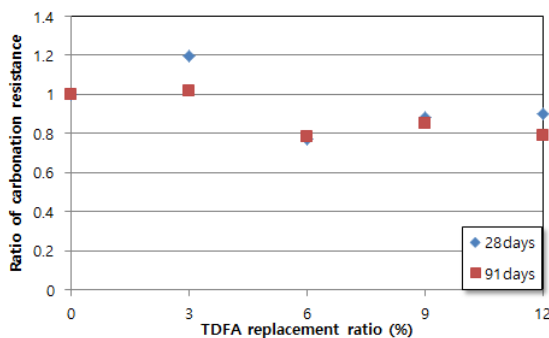


Fig. 9 Ratio of carbonation velocity with TDFA replacement ratios

### 3.2.3 촉진염해 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 염화물 저항 특성을 평가하기 위해 Tang's method에 따라 비정상상태의 염화물 촉진시험을 수행한 뒤, 확산계수를 도출하였다. 재령 28 및 91일의 원주형 공시체를 50 mm 두께로 절단하여 24시간동안 증류수에 침지시킨 후 음극 셀에 0.5 M NaCl 수용액을 양극 셀에 0.3 M NaOH 수용액을 채웠다. 이후 30 V의 전압을 8시간동안 인가함으로써 염화물 침투를 촉진시켰다. 시험 후 시편은 조깅 인장시험을 통해 단면을 확보하고 기준에 제안된 Otsuki 등의 방법으로 0.1 N AgNO<sub>3</sub> 용액을 분무시켜 침투깊이를 측정하였다. 확산계수 도출 식은 식 (1)과 같다.

$$D_d = \frac{RTL}{ZF\Delta E} \cdot \frac{x_d - \alpha x_d^{0.5}}{t} \quad (1)$$

여기서,  $D_d$ 은 염화물 이온 확산계수( $m^2/s$ ),  $x_d$ 는 염화물 이온의 침투깊이(m),  $\Delta E$ 는 적용전압(V),  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 절대온도,  $Z$ 는 이온가,  $F$ 는 패러데이 상수,  $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{ZF\Delta E}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$ ,  $c_d$ 는 침투깊이에서의 염화물이온 농도( $\approx 0.7$  M),  $L$ 은 시편 두께(0.05 m),  $c_0$ 는 확산 셀에서의 염소이온 농도(M)이다.  $\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$ 은 확산 셀의 염화물 농도가 0.5 M인 경우 0.764이다.

Fig. 10에서는 확산계수 실험사진을 나타내고 있다. Fig. 11에서는 확산계수의 평균값을 나타내었으며, Fig. 12에서는 탄산화와 마찬가지로 TDFA 치환률에 따른 확산계수 비를 나타내었다.

28일에서 91일로 재령이 증가했을 경우 염화물 확산계수는 45~53% 수준으로 감소하였다. 이는 재령의 증가에 따른 수화물 생성에 주원인이 있으며, 재령 영향은 탄산화 저항성과 거의 비슷한 수준으로 나타났다. Fig. 12에서 나타난 것



Fig. 10 Photo for accelerated diffusion coefficient

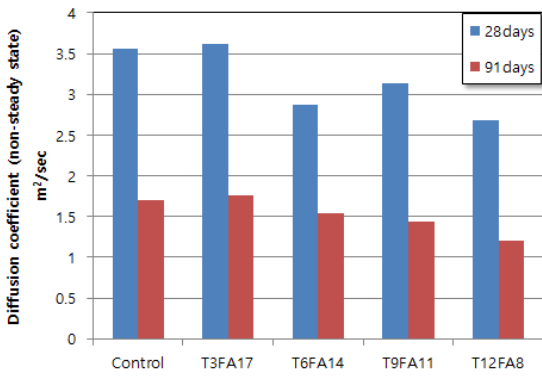


Fig. 11 Comparison with accelerated diffusion coefficient

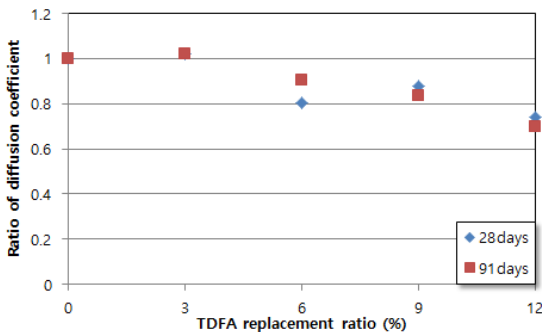


Fig. 12 Ratio of diffusion coefficient with TDFA replacement ratios

처럼 TDFA 치환률에 따른 효과는 매우 뚜렷하게 나타났다. 탄산화의 경우 FA의 치환에 따른 포졸란 반응의 영향, TDFA의 치환에 따른 수화영향, TDFA 미립분의 Packing Effect 등에 따라 거동이 명확하지 않았으나 염화물 확산계수의 경우 염화물 유입이 치환률의 증가에 따라 뚜렷하게 감소하였다. 이는 치환량이 작지만 기존의 연구에서 제시된 것처럼 Packing Effect<sup>15)</sup>로 인해 효과적으로 염화물 확산성이 감소되는 것을 알 수 있다. 재령별 치환효과는 거의 비슷했는데, 28일 재령에서는 75.3% 수준으로, 91일에서는 70.9% 수준으로 염화물 확산계수가 감소하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FA를 20% 치환한 콘크리트를 대상으로 FA를 TDFA로 중량대비 3~12%수준으로 치환하면서 공학적 특성을 평가하였다. 28일 및 91일 재령의 압축강도, 탄산화, 염화물 확산계수의 영향을 재령 및 치환률을 고려하여 분석하였으며, 이를 통하여 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 압축강도의 경우 28일 재령에서는 4.5~7.9%의 강도 증가를, 91일 재령에서는 4.4~7.5%의 증가를 나타내었는데, 이는 TDFA의 치환이 FA의 치환을 50% 이상 수행해도 강도에 큰 문제가 없음을 알 수 있다. FA의 양이 감소해도 장기적으로 TDFA의 Packing Effect와 추가적인 수화가 이를 보상하고 있음을 알 수 있다.

- 2) 91일 대상으로 한 시편에 대하여 공극률을 측정된 결과, 4.3~4.5% 수준의 공극률 개선효과가 나타났다. 이는 FA 콘크리트의 공극률이 크게 감소하는 사실을 고려하면, TDFA의 Packing Effect가 효과적으로 공극률을 추가적으로 감소시킴을 알 수 있다.
- 3) 탄산화의 경우 TDFA 12%치환시 최대 80%수준으로 탄산화 속도계수가 감소하였으며, 재령이 28일에서 91일로 증가하면서 공극률은 48~58%수준으로 감소하였다. 이는 TDFA가 혼입되어도 FA의 포졸란 반응에 방해가 되지 않으며 동등 이상의 탄산화 저항성을 나타낸다고 할 수 있다.
- 4) 염화물 확산계수의 경우, 28일 재령결과보다 91일 재령에서 45~53%수준으로 확산계수가 감소하였다. 또한 28일 및 91일에서 TDFA 치환률의 증가에 따라 75.3~70.9% 수준으로 염화물 확산계수가 뚜렷하게 감소하여 염화에 매우 효과적으로 저항할 수 있음을 알 수 있다.
- 5) 본 연구에서는 FA를 TDFA로 치환하여 제조된 콘크리트를 대상으로, 장기성능 및 내구성 평가를 수행하였다. 6~12% 수준의 치환은 콘크리트 내구성능에 효과적이었으나, 높은 황이온에 따른 에트린자이트 생성, 다량 치환시 미연탄소분에 따른 슬러리와 색상 변화, 비교적 큰 성분의 변동성 및 유통구조, 고분말에 따른 작업성의 저하 등의 문제점은 장기적으로 검토되어야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 호남권 생태산업단지(EIP) 구축사업을 수행된 것이며 저자는 이에 감사드립니다.

#### References

1. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1997, pp. 1-15.
2. Sarja, A., and Vesikari, E., *Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL*, E&FN, London, 1994, pp. 28-52.
3. Kwon, S.-J., Park, S.-S., and Lho, B.C., "Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed Long-Term Chloride Exposure Test", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 283-290.
4. Moon, H. Y., Shin, D. G., and Choi, D. S., "Evaluation of the Durability of Mortar and Concrete Applied with Inorganic Coating Material and Surface Treatment System", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 2, 2007, pp. 362-69.
5. Back, J. H., Tae, S. H., Roh, S. J., Lee, J. H., and Shin, S. W., "A Study on the Requisite Elements of LCCO<sub>2</sub> Evaluation System at Planning Stage of Building", *Korean Journal of*

- Construction Engineering and Management*, Vol. 12, No. 3, 2011, pp. 31-41.
6. Lee, S. H., Park, W. J., and Lee, H. S., "Lifecycle CO<sub>2</sub> Assessment Method for Concrete using CO<sub>2</sub> Balance and Suggestion to Decrease LCCO<sub>2</sub> of Concrete in South-Korean Apartment", *Energy and Buildings*, Vol. 58, No. 1, 2013, pp. 93-102.
  7. Oh, B. H., and Koh, C. K., "A Study on the Strength and Mechanical Characteristics of Normal and High-Strength Fly-Ash Concretes", *Journal of the Korea concrete institute*, Vol. 3, No. 6, 2012, pp. 87-95.
  8. Saraswathy, V., Muralidharan, S., and Srinivasan, S., "Electrochemical Studies on the Corrosion Performance of Activated Fly Ash Blended Cements", *Materials Engineering*, Vol. 14, No. 3, 2003, pp. 261-284.
  9. Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., and Kim, J. H., "A Study on the Carbonation Characteristics of Fly Ash Concrete by Accelerated Carbonation Test", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 449-455.
  10. Yoo, S. W., Koh, K. T., Kwon, S. J., and Park, S. G., "Analysis Technique for Flexural Behavior in RC Beam Considering Autogenous Shrinkage Effect", *Construction and Building Materials*, Vol. 47, No. 1, 2013, pp. 560-568.
  11. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H., "Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion", *Structural Safety*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 75-83.
  12. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., "Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, 2003, pp. 91-126.
  13. Neville, A. M., *Properties of concrete: 4th ed*, England: Longman Group, 1995, England, pp. 23-58.
  14. Lee, H. H., and Kwon, S. J., "Evaluation of Chloride Penetration in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag Considering Fineness and Replacement Ratio", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 26-34.
  15. Lee, M. Hi., Kwon, S. J., and Park, K. T., "Mechanical Properties in Rice Husk Ash and OPC Concrete with Coconut Fiber Addition Ratios", *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 117-124.
  16. Al-Akhras, N. M., and Smadi, M. M., "Properties of Tire Rubber Ash Mortar", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 7, 2004, pp. 821-826.
  17. Jung, S. H., and Kwon, S. J., "Engineering Properties of Cement Mortar with Pond Ash in South Korea as Construction Materials: from waste to concrete", *Central European journal of engineering*, Vol. 3, No. 3, 2013, pp. 522-533.
  18. Tang, L., "Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176, 1996, pp. 173-179.
  19. KS F 2405, *Standard test method for compressive strength of concrete*, Korean Standards Service Network, 2010, pp. 1-3.
  20. KS F 2584, *Standard test method for accelerated carbonation of concrete*, Korean Standards Service Network, 2015, pp. 1-4.
  21. Kobayashi, K., and Uno, Y., "Mechanism of carbonation of concrete", *Concrete Library of JSCE*, Vol. 16, No. 12, 1990, pp. 139-151.
  22. Kwon, S. J., and Song, H. W., "Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 1, 2010, pp. 119-127.
  23. Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., and Kim, J.-H., "A Study on the Carbonation Characteristics of Fly Ash Concrete by Accelerated Carbonation Test", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 449-455.

**요 약** 본 연구에서는 FA (Fly Ash)를 20%치환한 배합에 대하여 TDFA (Tire Derived Fuel Ash)를 3.0~12.0%까지 증량 치환하면서 내구성 평가를 수행하였다. TDFA는 열병합발전소에서 열효율을 높이기 위해 폐타이어를 혼소시킨 뒤 발생한 산업부산물로서 국내에서 콘크리트에 적용한 연구는 없는 상태이다. 이를 위해 물-결합재를 50%, FA를 20% 치환한 Control 콘크리트를 제조하였으며, TDFA를 치환하면서 압축강도, 촉진 탄산화 시험, 촉진염해 시험, 공극구조평가를 수행하였다. 압축강도, 탄산화, 공극구조에서는 12%까지 TDFA를 FA와 치환해도 동등이상의 성능을 확보하였다. 특히 염해에 대해서는 TDFA의 치환률의 증가에 따라 뚜렷한 염화물 확산계수의 감소를 나타내어 최종적으로 75.3~70.9%까지 염화물 확산계수가 감소하였다. TDFA를 혼입한 콘크리트 배합시, 워커빌리티의 확보가 가능하다면 TDFA를 혼입한 콘크리트는 내구성 개선에 효과적일 것으로 판단된다.

**핵심용어** : TDFA, 내구성, 플라이애쉬, 콘크리트, 탄산화, 염화물 확산, 공극률